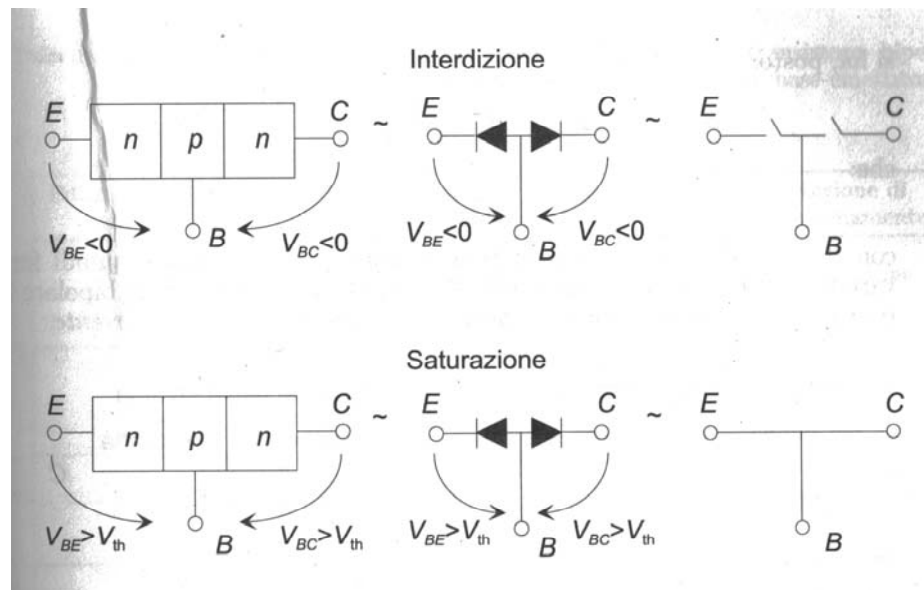


Il BJT Bipolar Junction Transistor: comportamento statico

- E' costituito da due giunzioni PN polarizzate in modo diretto od inverso:
 - Interdizione: $V_{BE} < 0$ $V_{BC} < 0$; le correnti sono pari a quelle di saturazione inversa delle relative giunzioni
 - Saturazione: $V_{BE} > V_{th}$ e $V_{BC} > V_{th}$, con V_{th} tensione di soglia delle due giunzioni; in queste condizioni la tensione ai capi è bloccata alla soglia e la corrente è regolata dal circuito esterno
 - Zona Attiva diretta: $V_{BE} > V_{th}$ $V_{BC} < 0$; si ha iniezione di portatori in base che non si ricombinano grazie alla ridotta dimensione della base e vengono raccolti dal collettore.



Il BJT Bipolar Junction Transistor: comportamento statico

- Il principio di funzionamento si basa sull'ipotesi che L_{nB} sia \gg della W_B . In queste condizioni

$$|I_C| \approx |I_E| \quad \text{ossia:} \quad |I_C| = \alpha |I_E|$$

- Con $\alpha \sim 1$ e $\alpha < 1$, si trova:

$$|I_B| = |I_E| - |I_C| = \frac{1-\alpha}{\alpha} |I_C|$$

- Ponendo:

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$$

- si trova:

$$|I_C| = \beta |I_B|$$

Il BJT Bipolar Junction Transistor: comportamento statico

- Si registrano i seguenti flussi di carica:
 - F_{nEB} : flusso di elettroni iniettati dall'E in B a causa della polarizzazione diretta della giunzione BE
 - F_{hBE} : flusso di lacune iniettate in E da B. è una componente indesiderata in quanto non contribuisce alla corrente I_C mentre aumenta I_B
 - F_{nBC} : flusso di elettroni che raggiungono il collettore attraverso la base. Gli elettroni si ricombinano in base con le lacune fornite dalla corrente I_B
 - F_{nBC0} F_{hCB0} : corrente inversa di saturazione della giunzione BC, sono correnti parassite e non controllate dalla B

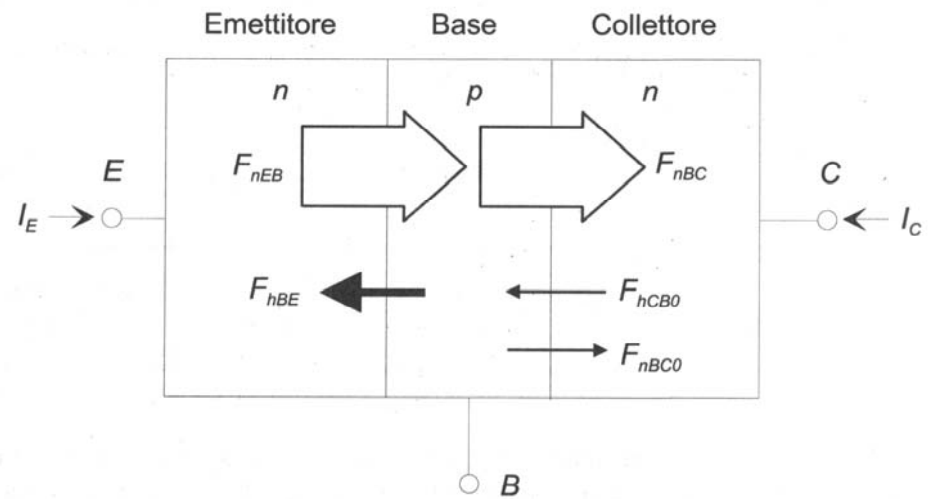
$$I_E = -qF_{hBE} - qF_{nBE}$$

$$I_C = qF_{nBC} + qF_{nBC0} + qF_{hCB0}$$

$$I_{CB0} = qF_{nBC0} + qF_{hCB0}$$

$$I_B = qF_{hBE} + qF_{nEB} - qF_{nBC} - I_{CB0}$$

Lacune ricombinate con eEB rifornite dal terminale di base



Il BJT Bipolar Junction Transistor: comportamento statico

- Si definiscono i seguenti coefficienti:
 - *efficienza di emettitore*, la parte utile di corrente di E.

$$\gamma = \frac{F_{nEB}}{F_{nEB} + F_{hBE}}$$

- Fattore di trasporto di B:

$$b = \frac{F_{nBC}}{F_{nEB}}$$

- Amplificazione di corrente a base comune $\alpha = \gamma b$

La precedente relazioni che esprimono la corrente di E, può essere riscritta come:

$$I_C = -\alpha I_E + I_{CB0}$$

Dalla quale si ricava introducendo la KCL:

$$I_C = -\frac{\alpha}{1-\alpha} I_B + \frac{I_{CB0}}{1-\alpha} \longrightarrow I_C = \beta I_B + (1+\beta) I_{CB0}$$

Il BJT Bipolar Junction Transistor: comportamento statico

- Il tempo di transito, è un parametro fisico del BJT che esprime anche una figura di merito

È il tempo medio impiegato dai portatori per attraversare la zona neutra di B

- Possiamo scrivere:

$$I_C = -\frac{dQ_B}{dt} = \frac{Q_B}{\tau_t}; \quad I_B = -\frac{dQ_B}{dt} = \frac{Q_B}{\tau_0}$$

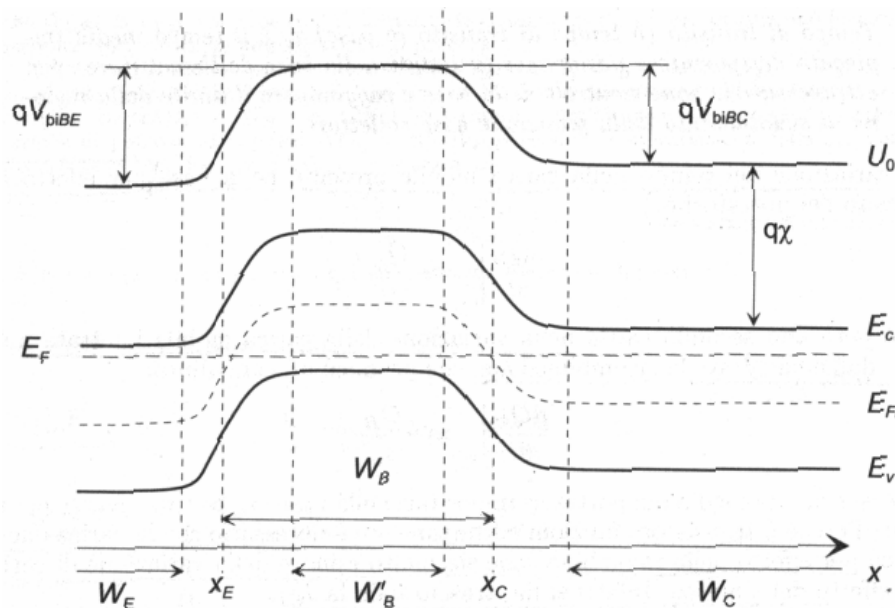
- Ovvero la corrente di base dipende dalle ricombinazioni e quindi dal tempo di vita medio, τ_0 , mentre quella di collettore dal tempo di transito, τ_t .

- Si trova quindi:

$$\beta = \left| \frac{I_C}{I_B} \right| \approx \frac{\tau_0}{\tau_t}$$

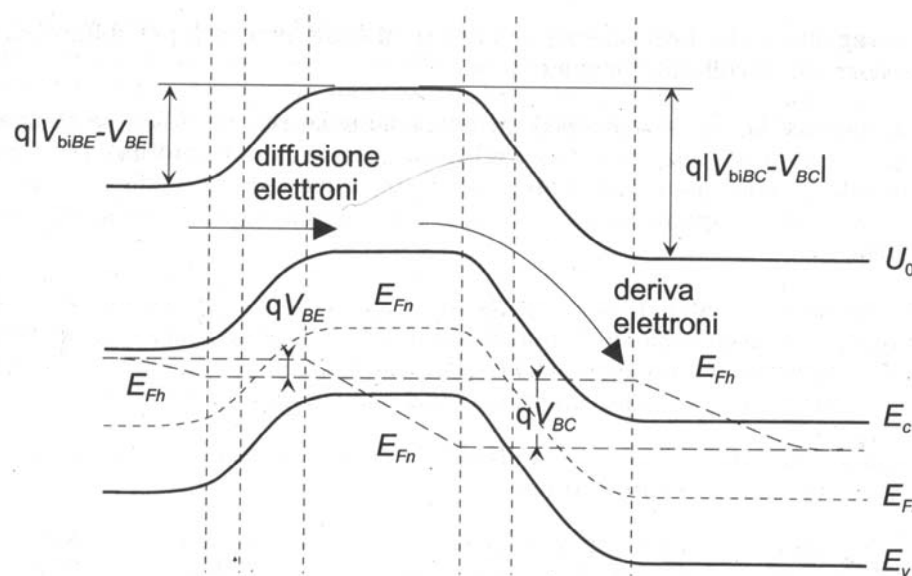
Il BJT Bipolar Junction Transistor: comportamento statico

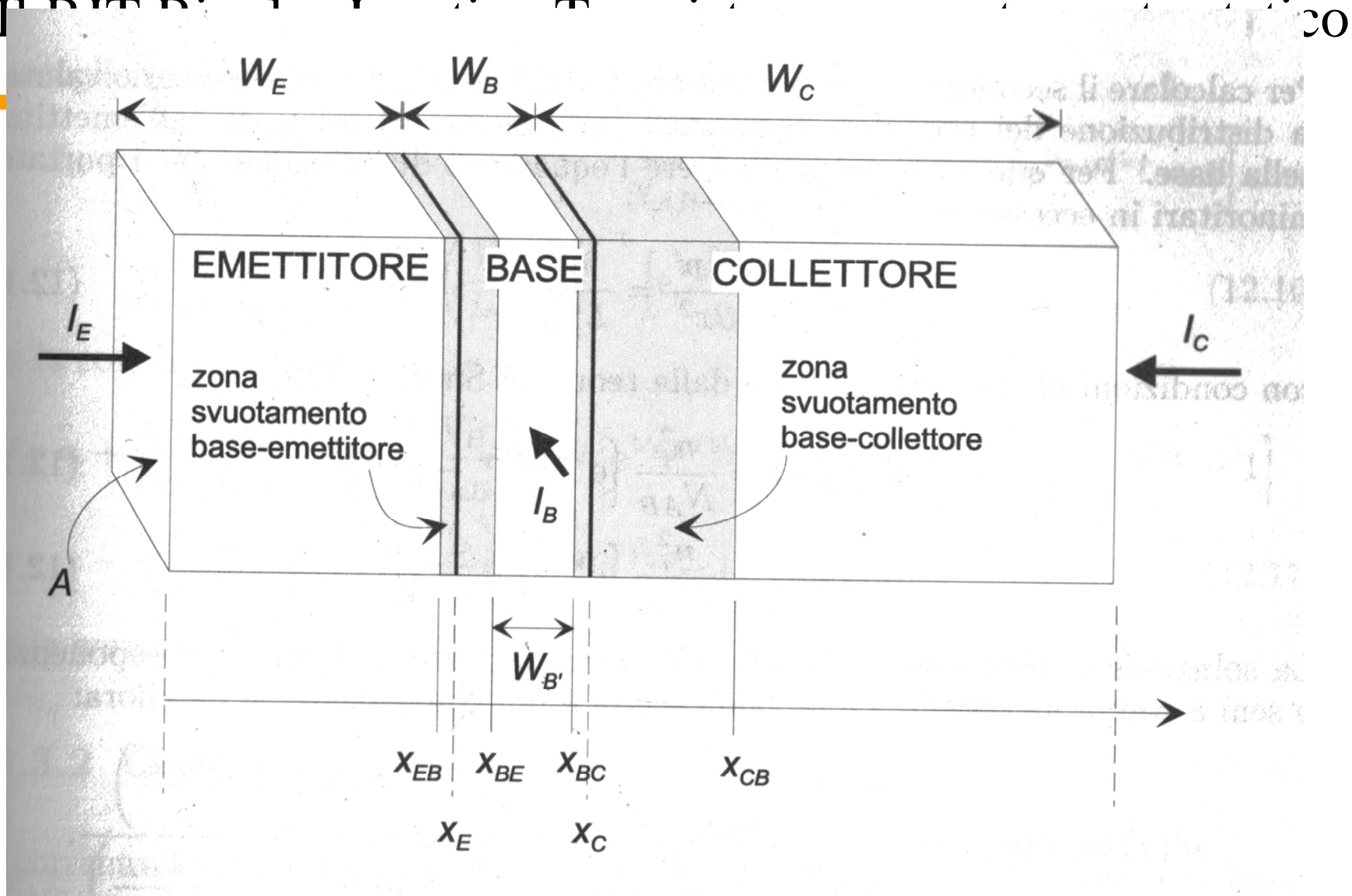
- Diagramma a bande di energia in equilibrio termodinamico
 - È necessario che la lunghezza di diffusione degli elettroni in base sia molto maggiore dello spessore della base
 - Nella trattazione che segue il drogaggio è uniforme, lo spessore attivo della base coincide con quello fisico
 - Si trascurano perdite ohmiche



Il BJT Bipolar Junction Transistor: comportamento statico

- Quando si applicano delle polarizzazioni tali da porre il BJT in zona attiva si ha il seguente diagramma a bande di energia
 - Si vede l'effetto di iniezione e raccolta dei portatori, dovuto al campo elettrico che si stabilisce nella regione svuotata BC
 - Non siamo all'equilibrio termodinamico quindi elettroni e lacune hanno livelli di Fermi distinti (quasi-livelli di Fermi)

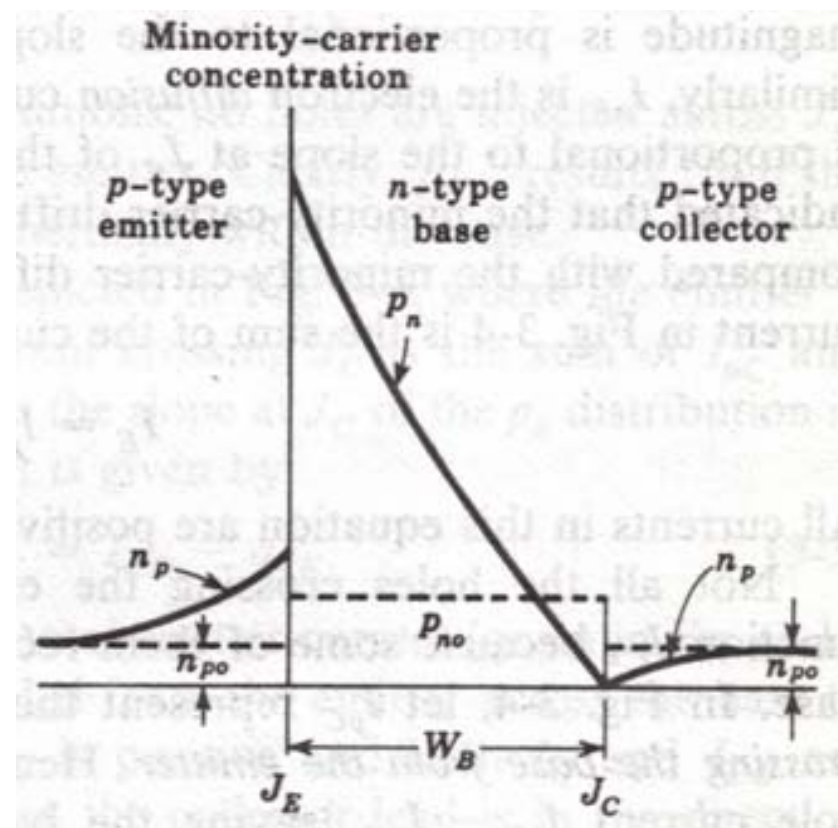




Il BJT Bipolar Junction Transistor: comportamento statico

■ Concentrazione dei portatori in zona attiva diretta

- Si hanno correnti di portatori minoritari iniettati in base che diffondono verso il collettore
- Nella figura siamo nelle ipotesi di funzionamento in regione attiva e con semiconduttori ‘lunghi’
- i portatori iniettati obbediscono alle equazioni di Shockley
- Nelle regioni di E e C la diffusività è regolata dalle relazioni già viste per la giunzione PN
- Nella zona B la diffusività segue un andamento diverso



Il BJT Bipolar Junction Transistor: comportamento statico

■ Correnti di collettore ed emettitore:

- analogamente a quanto fatto nel caso delle giunzioni PN, queste saranno la somma dei contributi minoritari ai capi della regione svuotata:

$$I_E = I_{h,d}(x_{EB}) + I_{n,d}(x_{BE}); \quad -I_C = I_{n,d}(x_{BC}) + I_{h,d}(x_{CB})$$

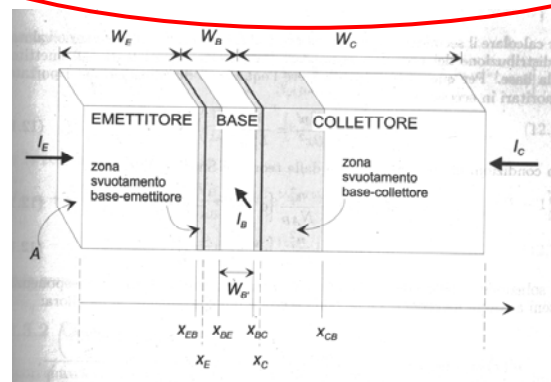
$$I_{h,d}(x_{EB}) = -qAD_h \left. \frac{\partial p'}{\partial x} \right|_{x=x_{EB}} ;$$

$$I_{n,d}(x_{BC}) = qAD_n \left. \frac{\partial n'}{\partial x} \right|_{x=x_{BC}} ;$$

$$I_{n,d}(x_{BE}) = qAD_n \left. \frac{\partial n'}{\partial x} \right|_{x=x_{BE}}$$

$$I_{h,d}(x_{CB}) = qAD_p \left. \frac{\partial p'}{\partial x} \right|_{x=x_{CB}}$$

Contributi che possono essere calcolati immediatamente



Il BJT Bipolar Junction Transistor: comportamento statico

- Il primo e quarto contributo possono essere calcolati immediatamente ricorrendo ai risultati della teoria della giunzione PN

$$I_{h,d} (x_{EB}) = - \frac{q A D_h n_i^2}{N_{DE} W_E} \left[e^{V_{BE}/V_T} - 1 \right]$$

$$I_{h,d} (x_{CB}) = - \frac{q A D_h n_i^2}{N_{DC} W_C} \left[e^{V_{BC}/V_T} - 1 \right]$$

- Adesso dobbiamo porci il problema del calcolo del profilo di diffusione dei portatori di minoranza nella regione di base
- Per questo dobbiamo risolvere l'equazione che deriva dall'analisi dello scostamento dalla neutralità nello spazio, costante nel tempo (si veda #18 parte 3).

Il BJT Bipolar Junction Transistor: comportamento statico

- L'eq. di diffusione dei portatori minoritari è:

$$\frac{\partial^2 n'}{\partial x^2} = \frac{n'}{L_{nB}^2}$$

- Con le condizioni al contorno:

$$n'(x_{BE}) = \frac{n_i^2}{N_{AB}} \left[e^{V_{BE}/V_T} - 1 \right]; \quad n'(x_{BC}) = \frac{n_i^2}{N_{AB}} \left[e^{V_{BC}/V_T} - 1 \right]$$

- Ipotizzando che le dimensioni della base siano piccole rispetto a L_{nB} , la soluzione generale assume la forma:

$$n' = K_1 + K_2 x$$

- Sostituendo le condizioni al contorno si trova:

Il BJT Bipolar Junction Transistor: comportamento statico

- Sostituendo le condizioni al contorno si trova:

$$I_E = -\frac{qAD_h n_i^2}{N_{DE}W_E} \left[e^{V_{BE}/V_T} - 1 \right] - \frac{qAD_n n_i^2}{N_{AB}W_B} \left[e^{V_{BE}/V_T} - 1 \right] + \frac{qAD_n n_i^2}{N_{AB}W_B} \left[e^{V_{BC}/V_T} - 1 \right]$$

$$I_C = \frac{qAD_n n_i^2}{N_{AB}W_B} \left[e^{V_{BE}/V_T} - 1 \right] - \frac{qAD_h n_i^2}{N_{DC}W_C} \left[e^{V_{BC}/V_T} - 1 \right] - \frac{qAD_n n_i^2}{N_{AB}W_B} \left[e^{V_{BC}/V_T} - 1 \right]$$

- Da cui la corrente di Base $I_B = -I_C - I_E$:

$$I_B = \frac{qAD_h n_i^2}{N_{DE}W_E} \left[e^{V_{BE}/V_T} - 1 \right] + \frac{qAD_h n_i^2}{N_{DC}W_C} \left[e^{V_{BC}/V_T} - 1 \right]$$

Il BJT Bipolar Junction Transistor: comportamento statico

- Sempre nelle condizioni di dimensioni corte si trovano i parametri di guadagno del BJT in forma semplificata, e valide nel caso in cui E sia molto più drogato di B:

$$\alpha \approx - \frac{\mu_h N_{AB} W_B}{\mu_n N_{DE} W_E}$$

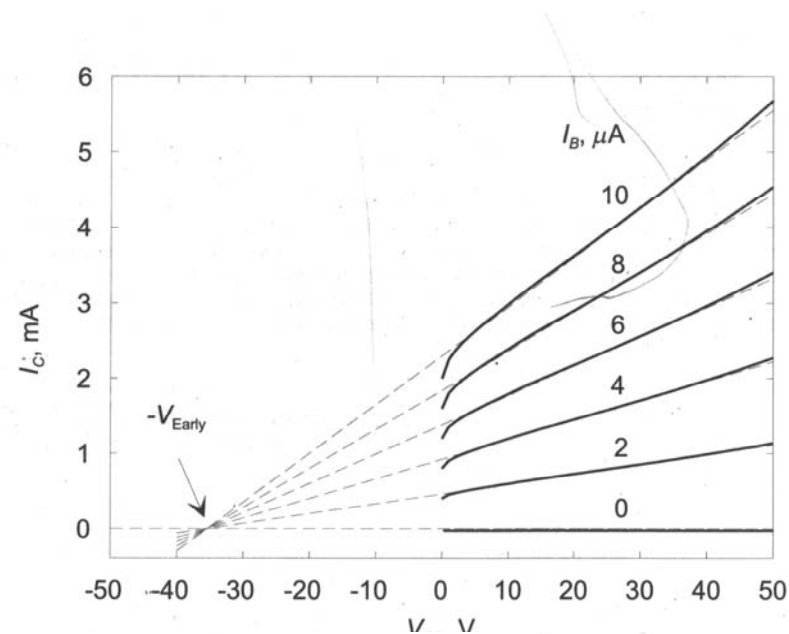
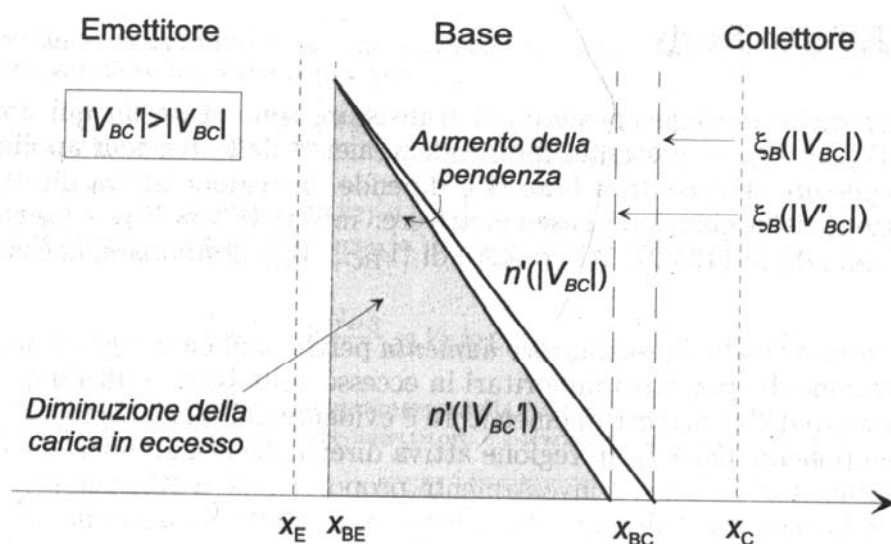
$$\beta \approx \frac{\mu_n N_{DE} W_E}{\mu_h N_{AB} W_B}$$

$$\tau_t \approx - \frac{1}{2} \frac{W_B^2}{D_n}$$

Il BJT Bipolar Junction Transistor: comportamento statico

■ Effetto Early

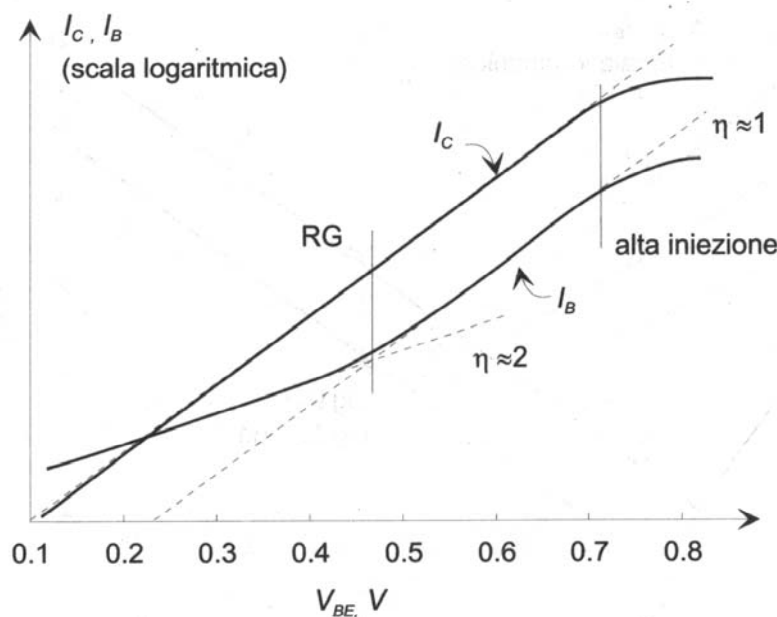
- Mentre in un BJT ideale $I_C = \beta I_B$, la corrente di collettore aumenta perché la regione di base W_b efficace si restringe all'aumentare della tensione V_{bc} .
- Viceversa la corrente di base aumenta in quanto si ha una riduzione delle ricombinazioni



Il BJT Bipolar Junction Transistor: comportamento statico

■ Diagramma di Gummel

- Si notano le deviazioni rispetto all'idealità dovute alla Generazione+Ricombinazione ed effetto di alta iniezione in base, il quale consiste in un aumento del drogaggio equivalente in base.
- Con alte iniezioni si ha anche un aumento di portatori in base che respingono ulteriori portatori, riducendo l'efficienza di emettitore.



Il BJT Bipolar Junction Transistor: comportamento dinamico

■ Modello del BJT: Ebers-Moll

- Le correnti del BJT possono essere scritte nella seguente forma:

$$I_E = a_{11} \left[e^{V_{be}/V_T} - 1 \right] + a_{12} \left[e^{V_{bc}/V_T} - 1 \right]$$

$$I_C = a_{21} \left[e^{V_{be}/V_T} - 1 \right] + a_{22} \left[e^{V_{bc}/V_T} - 1 \right]$$

- Dove:

$$a_{11} = -\frac{qAD_h n_i^2}{N_{DE}W_E} - \frac{qAD_n n_i^2}{N_{AB}W_B}$$

$$a_{21} = \frac{qAD_n n_i^2}{N_{AB}W_B}$$

$$a_{12} = \frac{qAD_n n_i^2}{N_{AB}W_B}$$

$$a_{22} = -\frac{qAD_h n_i^2}{N_{DC}W_C} - \frac{qAD_n n_i^2}{N_{AB}W_B} -$$

Il BJT Bipolar Junction Transistor: comportamento dinamico

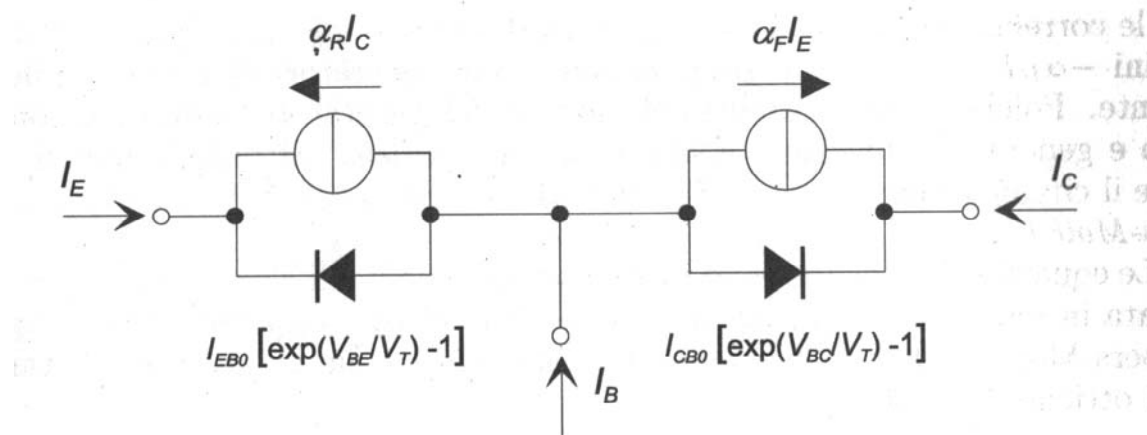
■ Modello del BJT: Ebers-Moll

- In generale per un BJT si può scrivere che:

$$I_C = -\alpha_F I_E + I_{CB0} \left[e^{V_{bc}/V_T} - 1 \right]$$

$$I_E = -\alpha_R I_C + I_{EB0} \left[e^{V_{be}/V_T} - 1 \right]$$

- Il quale si può descrivere circuitalmente come:



Il BJT Bipolar Junction Transistor: comportamento dinamico

■ Modello del BJT: Ebers-Moll

- Le precedenti equazioni sebbene ricavate in modo semi-empirico possono essere ricondotte a quelle ricavate per via analitica, infatti mettendole in forma esplicita si ha:

$$I_E = \frac{-I_{EB0}}{1 - \alpha_R \alpha_F} \left[e^{V_{be}/V_T} - 1 \right] + \frac{\alpha_R I_{CB0}}{1 - \alpha_R \alpha_F} \left[e^{V_{bc}/V_T} - 1 \right]$$

$$I_C = \frac{\alpha_F I_{EB0}}{1 - \alpha_R \alpha_F} \left[e^{V_{be}/V_T} - 1 \right] + \frac{-I_{CB0}}{1 - \alpha_R \alpha_F} \left[e^{V_{bc}/V_T} - 1 \right]$$

- Dalle quale si osservano le analogie con l'eq. di # 16 .
- Un'altra formulazione molto utile è la seguente:

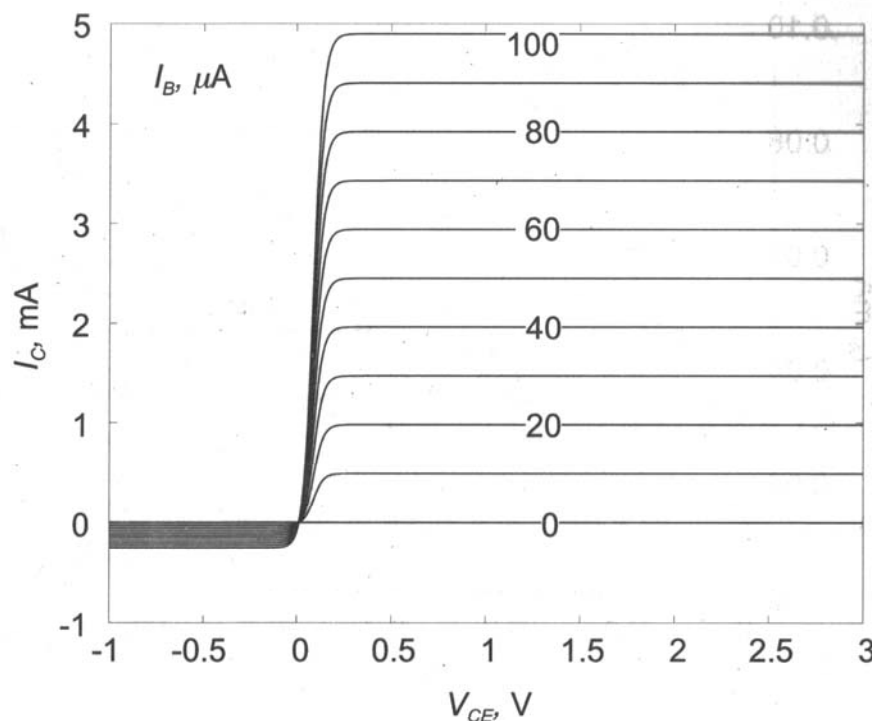
$$I_E = -I_{E0} \left[e^{V_{be}/V_T} - 1 \right] + \alpha_R I_{C0} \left[e^{V_{bc}/V_T} - 1 \right]$$

$$I_C = \alpha_F I_{E0} \left[e^{V_{be}/V_T} - 1 \right] - I_{C0} \left[e^{V_{bc}/V_T} - 1 \right]$$

Il BJT Bipolar Junction Transistor: comportamento dinamico

■ Caratteristiche I/V ad Emettitore comune

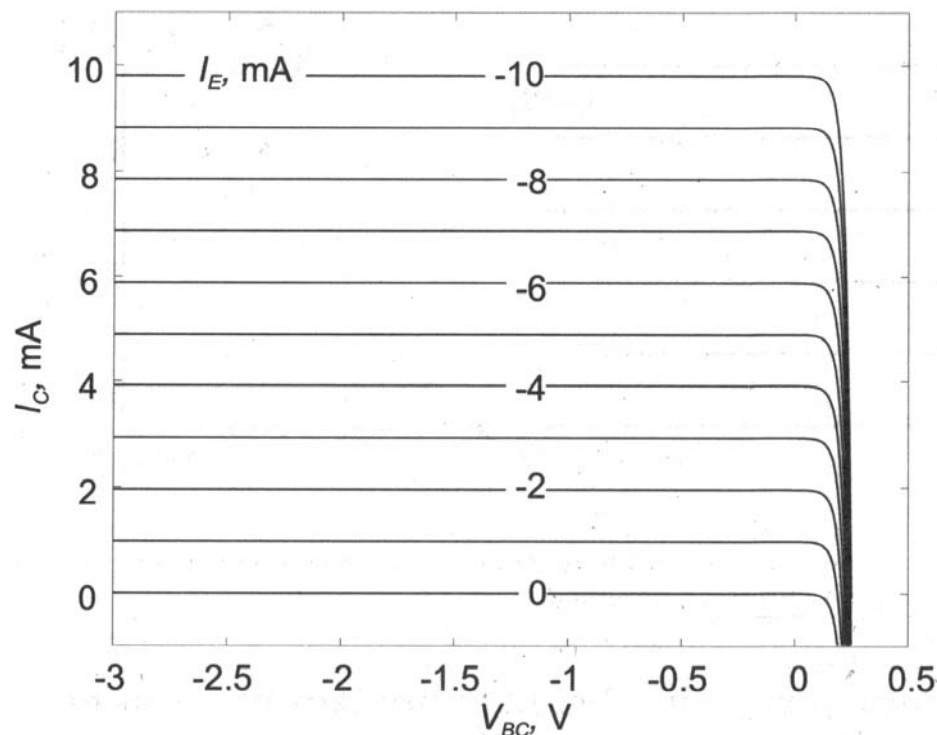
- Nelle caratteristiche di uscita, la corrente è costante per $V_{ce} < 0.25V$. Infatti $V_{ce} = V_{be} - V_{bc}$, con $V_{be} \sim 0.5V$ la giunzione BC va sotto soglia ovvero: $V_{bc} < 0.3V$.
- Si noti come β_R e β_F siano diversi



Il BJT Bipolar Junction Transistor: comportamento dinamico

■ Caratteristiche I/V a base comune

- Nelle caratteristiche di uscita, la corrente è costante per $V_{bc} < 0.25\text{V}$, questi valori permettono il mantenimento della zona attiva diretta.
- Per $V_{bc} > 0.25$ anche la giunzione BC entra in conduzione ed il BJT va in saturazione



Il BJT Bipolar Junction Transistor: comportamento dinamico

- Circuito equivalente a π
- Si ricava che:

$$g_{BB} = \frac{I_B}{V_T} \approx \frac{(1 - \alpha_F) I_{E0}}{V_T} e^{V_{BE}/V_T} = \frac{I_C}{\beta V_T}$$

$$g_{BC} = \frac{-I_C}{\beta V_{EARLY}} \approx 0$$

$$g_{CB} \approx \frac{\alpha_F I_{E0}}{V_T} e^{V_{BE}/V_T} = \frac{I_C}{V_T} = \frac{\beta I_B}{V_T}$$

$$g_{CC} = \frac{I_C}{V_{EARLY}} \approx 0$$

Il BJT Bipolar Junction Transistor: comportamento dinamico

- Circuito equivalente a π

- Si ricava che:

$$r_{BE} = \frac{1}{g_{BB} + g_{BC}} \approx \frac{V_T}{I_C}$$

$$r_{BC} = \frac{1}{-g_{BC}} = \frac{\beta V_{EARLY}}{I_C}$$

$$g_m = g_{CB} - g_{BC} = \frac{I_C}{V_T} = \frac{\beta I_B}{V_T}$$

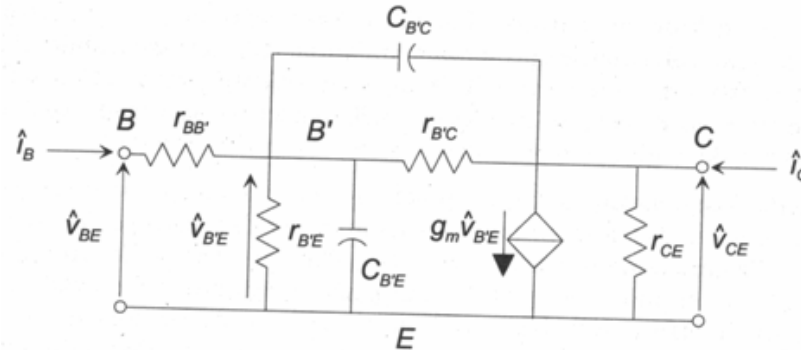
$$r_{CE} = \frac{1}{g_{CC}} = \frac{V_{EARLY}}{I_C}$$

- Per quanto riguarda la capacità:

$$C_{BE} = \left| \frac{\partial Q_B}{\partial V_{BE}} \right| = \underbrace{\left| \frac{\partial Q_B}{\partial I_E} \right|}_{\tau_t} \underbrace{\left| \frac{\partial I_E}{\partial V_{BE}} \right|}_{g_m} = \tau_t g_m$$

Il BJT Bipolar Junction Transistor: comportamento dinamico

- Infine si ha il circuito equivalente a π



- Dal quale si ricava

$$\beta(\omega) = \frac{i_C}{i_B} = \frac{g_m r_{BE}}{1 + j\omega (C_{B'E} - C_{B'C}) r_{BE}} = \frac{\beta}{1 + j \frac{f}{f_\beta}}$$

- Dove:

$$f_\beta = \frac{1}{1 + j\omega (C_{B'E} - C_{B'C}) r_{BE}}$$

- Si definisce anche:

$$f_T = \frac{\beta}{2\pi (C_{B'E} - C_{B'C}) r_{B'E}} \gg f_\beta$$